

Pomiary efektywnego współczynnika odbicia generatorów mikrofalowych

Measurements of the effective reflection coefficient of microwave generators

Łukasz Usydus (Główny Urząd Miar)

Współczynnik odbicia jest ważnym parametrem charakteryzującym przyrządy pracujące w paśmie mikrofalowym. Typowe metody pomiaru współczynnika odbicia nie znajdują bezpośredniego zastosowania w przypadku wzorcowania źródeł mocy wielkiej częstotliwości. W artykule przedstawiono układy oraz techniki pomiarowe, które mogą do tego celu posłużyć.

The reflection coefficient is an important parameter characterizing instruments working in the microwave band. Typical methods of measuring the reflection coefficient are not directly applicable in the case of calibration of high-frequency power sources. This article presents systems and measurement techniques that can be used for this purpose.

Wprowadzenie

Przyrządy wytwarzające sygnał elektryczny wielkiej częstotliwości (w.cz.) występują praktycznie w każdym mikrofalowym układzie pomiarowym. Istotnym parametrem charakteryzującym urządzenia mikrofalowe jest współczynnik odbicia lub jego pochodna, czyli współczynnik fali stojącej. Obie wielkości wynikają z niedopasowania impedancji urządzenia do impedancji linii transmisyjnej i określają, jaka część mocy w.cz. docierającej do urządzenia, zostanie odbita od jego wrót wejściowych. W mikrofalowych torach transmisyjnych, gdzie istotna jest minimalizacja strat, należy zadbać o to, żeby odbicia mocy były jak najmniejsze.

Napięciowy współczynnik odbicia jest to wielkość zespolona wyznaczana, w płaszczyźnie wrót przyrządu (wejściowych lub wyjściowych), ze wzoru [1]:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{U^-}{U^+} = |\Gamma| \cdot e^{j\varphi} \quad (1)$$

gdzie:

Z – zespolona impedancja wrót przyrządu,

Z_0 – impedancja charakterystyczna linii transmisyjnej,

U^- – wartość fali napięciowej odbitej od wrót przyrządu,

U^+ – wartość fali napięciowej padającej na wrota przyrządu.

Moduł współczynnika odbicia przyjmuje (z nielicznymi wyjątkami) wartości z przedziału od 0 do 1. Graniczne wartości tego przedziału oznaczają odpowiednio idealne dopasowanie wrót pomiarowych do toru transmisyjnego (brak odbić) oraz całkowite odbicie sygnału od wrót pomiarowych. W praktyce często wykorzystywanym

w technice w.cz. parametrem jest współczynnik fali stojącej WFS , który obliczany jest ze wzoru:

$$WFS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

Jak nietrudno zauważyć WFS jest wielkością rzeczywistą, która przyjmuje wartości od 1 do nieskończoności. W ten sposób zdefiniowane parametry można mierzyć za pomocą linii pomiarowej ze szczeliną, wektorowego analizatora obwodów lub sześciowrotowego reflektometru wielkich częstotliwości [1].

Pomiar WFS generatorów

W przypadku generatorów, tradycyjne metody pomiaru WFS można zastosować jedynie w sytuacji, kiedy przyrząd nie wytwarza sygnału. Z tego powodu praktyczna wartość takiego pomiaru jest raczej niewielka. Podczas pracy generatora wytwarzany sygnał propaguje się w tym samym kierunku co odbita fala napięciowa z równania (1) i w zależności od różnicy faz zwiększa lub zmniejsza jej amplitudę, tym samym uniemożliwiając wiarygodny pomiar współczynnika odbicia we wrotach wyjściowych przyrządu.

Na rys. 1 przedstawiono układ służący do pomiaru WFS źródła sygnału w.cz., do budowy którego wykorzystano sprzęgacz kierunkowy, zwarcie przesuwne oraz miernik mocy. Sygnał z generatora wprowadzany jest do wrót nr 1 sprzęgacza, jego część zostaje odprowadzona do wrót sprzężonych nr 3. Następnie sygnał wędruje do wrót nr 2, gdzie ulega całkowitemu odbiciu w płaszczyźnie zwarcia. Odbita fala pada na wrota wyjściowe badanego generatora, gdzie ponownie ulega odbiciu, tym razem

częściowemu, w zależności od wartości mierzonego współczynnika odbicia. Podobnie jak w przypadku pierwotnego sygnału generatora, część fali odbitej od wyjścia przyrządu jest odsprzęgana do wrót nr 3 sprzęgacza. W efekcie przyrząd pomiarowy podłączony do wrót sprzężonych odczytuje wartość napięcia lub mocy wynikającą z superpozycji dwóch fal, która jest zależna od ich relacji fazowej. Dzięki zastosowaniu zwarcia przesuwne można jest zmiana różnicy faz sygnałów pojawiających się na wyjściu nr 3 sprzęgacza. W celu wyznaczenia *WFS* badanego generatora należy ustawić zwarcie w pozycjach, w których odczytywana moc jest maksymalna oraz minimalna, a następnie posłużyć się równaniem:

$$WFS = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} \quad (3)$$

gdzie:

P_{\max}, P_{\min} – odpowiednio maksymalna i minimalna moc odczytywana przy zmianie płaszczyzny zwarcia,

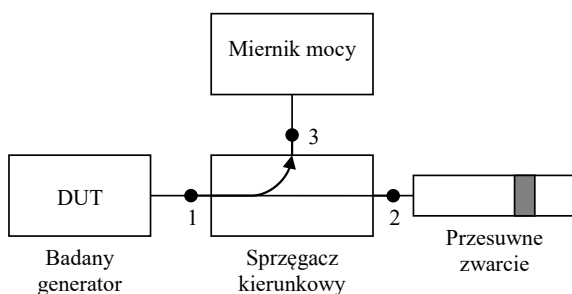
U_{\max}, U_{\min} – odpowiednio maksymalna i minimalna wartość napięcia odczytywana przy zmianie płaszczyzny zwarcia.

Powyższe równanie jest powszechnie stosowane w pomiarach *WFS* z wykorzystaniem linii pomiarowej ze szczeliną. W razie potrzeby można obliczyć także wartość bezwzględną efektywnego współczynnika odbicia generatora przekształcając równanie (2):

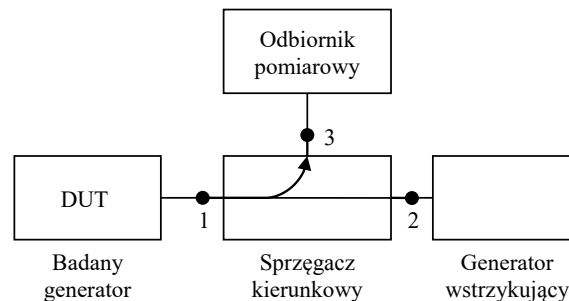
$$|\Gamma| = \frac{WFS - 1}{WFS + 1} \quad (4)$$

Przedstawiona metoda pomiarowa uniemożliwia niestety wyznaczenie fazy współczynnika odbicia.

Układ z rys. 1 jest dość wygodny w użyciu, ale nie może być zastosowany w zakresie częstotliwości, gdzie maksymalna zmiana odległości płaszczyzny zwarcia od wrót nr 2 sprzęgacza jest mniejsza niż połowa długości fali sygnału. Niemożliwe jest wówczas znalezienie maksymalnej oraz minimalnej wartości mocy lub napięcia, potrzebnych do obliczenia *WFS*. W takiej sytuacji zastosować można układ pomiarowy przedstawiony na rys. 2,



Rys. 1. Konfiguracja układu do pomiaru efektywnego współczynnika odbicia źródła promieniowania



Rys. 2. Konfiguracja układu do pomiaru efektywnego współczynnika odbicia źródła aktywnego, wykorzystującego źródło sygnału wtrysku

w którym przesuwne zwarcie zastąpione jest drugim generatorem wstrzykującym. Wstrzyknięty sygnał ma częstotliwość nieznacznie różniącą się od częstotliwości wytwarzanej przez badany przyrząd (np. o 10 Hz) [2]. Odczytywana wartość na mierniku będzie się wówczas zmieniać z częstotliwością równą różnicy częstotliwości obu źródeł. W tym układzie wygodnie jest zastąpić miernik mocy wysokiej klasy mikrofalowym odbiornikiem pomiarowym, pracującym w trybie „zero span”, co umożliwi znacznie łatwiejszy odczyt minimum i maksimum zmieniającej się w czasie amplitudy napięcia. Zastosowanie generatora wstrzykującego umożliwia pomiar na niskich częstotliwościach, wymaga jednak wykonania kalibracji polegającej na wyznaczeniu wartości średniej sygnału po podłączeniu do portu 1 sprzęgacza kolejno zwarcia oraz rozwarcia.

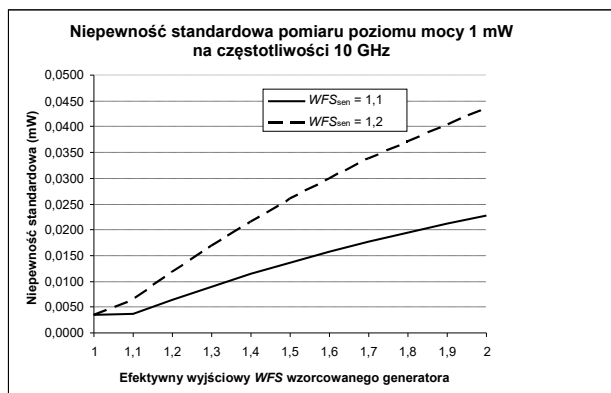
Zastosowanie w laboratorium wzorcującym

Podczas wzorcowania wszystkich przyrządów mikrofalowych pomiar *WFS* jest czynnością obowiązkową. W szczególności w sytuacji, gdy badanym przyrządem jest generator w.cz., ale nie tylko. Nawet jeśli urządzenie wzorcowane jest w zakresie innej wielkości (np. wartość współczynnika kalibracji dla czujnika mocy lub wartość tłumienia dla tłumika), znajomość *WFS* badanego elementu oraz *WFS* źródła sygnału testowego występującego w układzie pomiarowym jest niezbędna do wyznaczenia niepewności pomiaru. W układach pomiarowych, w których występuje generator sygnału w.cz., jedną ze składowych niepewności jest wpływ niedopasowania źródła oraz czujnika (lub miernika) na pomiar poziomu mocy, który wyraża się wzorem [3]:

$$M_u = 100 \cdot \left[\left(1 \pm |\Gamma_{\text{gen}}| \cdot |\Gamma_{\text{sen}}| \right)^2 - 1 \right] \% \quad (5)$$

gdzie Γ_{gen} i Γ_{sen} to współczynniki odbicia, odpowiednio wrót wyjściowych źródła mocy w.cz. oraz wrót wejściowych przyrządu mierzącego moc (lub napięcie).





Rys. 3. Złożona standardowa niepewność pomiaru poziomu mocy vs. VSWR badanego generatora RF

Często stosowaną praktyką w laboratoriach, które nie mierzą lub nie posiadają danych pomiarowych dotyczących niedopasowania wrót wyjściowych generatora, jest przyjęcie maksymalnej lub typowej wartości Γ_{gen} , podawanej przez producenta przyrządu w jego specyfikacji technicznej. Problem w tym, że zazwyczaj są to wartości zawyżone w stosunku do rzeczywistych, co w efekcie prowadzi do wyższej wartości końcowej niepewności pomiaru. Najczęściej spotykaną informacją w danych katalogowych na temat niedopasowania wyjścia generatora jest $WFS \leq 2$ (co oznacza, że $|\Gamma_{gen}| \leq 2$). Na rys. 3 przedstawiono wykres standardowej niepewności pomiaru podczas wzorcowania generatora w zakresie poziomu mocy, z użyciem termistorowych wzorców odniesienia. Zaprezentowano przebiegi w funkcji WFS_{gen} dla dwóch, w praktyce często spotykanych w paśmie częstotliwości do 18 GHz wartości WFS_{sen} równych 1,1 oraz 1,2.

Z pomiarów przeprowadzonych w Pracowni Mikrofal, Pola Elektromagnetycznego i Kompatybilności Elektromagnetycznej GUM wynika, że generatory są zazwyczaj

lepiej dopasowane, a ich WFS oscyluje w granicach $1,2 \div 1,3$. Bazując na wykresie z rys. 3 można stwierdzić, że wykorzystanie rzeczywistej wartości wyjściowego współczynnika fali stojącej generatora zamiast przyjęcia wartości z danych katalogowych pozwala na kilkukrotną redukcję niepewności pomiaru poziomu mocy wyjściowej urządzenia.

Podsumowanie

Zaprezentowane metody pomiaru efektywnego współczynnika odbicia generatora umożliwiają pełniejszą charakterystykę źródeł mocy w.cz. podczas ich wzorcowania. Dzięki temu użytkownik może wykorzystywać przyrząd w sposób bardziej świadomy, np. poprzez optymalizację toru transmisyjnego, w którym generator jest zazwyczaj używany. Ponadto, uzyskane wyniki pomiarów są użyteczne dla laboratoriów wzorcujących, gdyż pozwalają na zmniejszenie niepewności wzorcowań w układach wykorzystujących aktywne źródła mocy wielkiej częstotliwości.

Literatura

- [1] Dobrowolski J. A., Technika wielkich częstotliwości. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [2] Roberts P., Measuring output VSWR for an active levelled source. ARMMS RF & Microwave Society Conference, 2008.
- [3] Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements, Application Note 64-1B. Agilent Technologies, 2003.

Artykuł jest tekstem referatu (z drobnymi zmianami redakcyjnymi) przygotowanym na XIII konferencję naukowo-techniczną PPM'18.